

# 論文 透気性を指標としたモルタルの初期凍害判断手法の検討

本間 有也\*1・濱 幸雄\*2・中村 暢\*3・長井 智哉\*4

**要旨:** 本研究では初期凍害の被害箇所における組織の粗大化に着目し、初期凍害をトレント法（ダブルチャンバー法）による透気係数で判断できるかどうかについて検討を行った。まず、従来の方法である圧縮強度試験による初期凍害の判断を行った後、空隙構造の測定を行い初期凍害の被害箇所における組織の粗大化を確認した。次に、トレント法を用いて初期凍害の判断の可能性を検討し、初期凍害の凍結深さがトレント透気係数に影響を及ぼすことを示した。最後に、初期凍害が判断可能な深さを把握するため、初期凍害の深さがトレント透気係数に及ぼす影響について検討し、トレント法を用いて初期凍害が判断可能な深さを示した。

**キーワード:** 初期凍害, 圧縮強度, 空隙構造, トレント透気係数, 凍結深さ

## 1. はじめに

寒冷期のモルタル・コンクリートの施工上の問題として初期凍害が挙げられる。初期凍害とは、コンクリートの打ち込み後から硬化の初期段階で、凍結または数回の凍結融解の繰返しを受けることによって、組織が破壊し、強度低下、破損、ひび割れを起こす被害<sup>1)</sup>とされている。

実験・研究における供試体レベルでは、凍結後の養生による強度回復の程度で初期凍害の判断が行われるのが一般的であるが、実施工時においては躯体あるいは表層部の強度を測定することは困難であり、目視、施工空間またはコンクリートの温度管理による凍結の有無で判断されることが多く、コンクリートの品質で直接判断する方法はないのが現状である。また、向寒期の施工や軽微な構造物、仕上げモルタルの施工等では十分な養生や温度管理がなされることがなく、予期せぬ寒波により表層のコンクリートが初期凍害を受ける事例がある。

一般に、コンクリートが初期凍害を受けると強度低下、強度増進不能、透水性の増大、耐水性の損失などの障害が生じ、構造物として致命的な打撃を受ける<sup>2)</sup>といわれており、初期凍害の被害箇所に着目すると組織が粗大化

し、その結果として透気性が上昇していると思われる。

現在、透気性を評価する手法について様々な評価方法が報告されている<sup>3)</sup>が、その中で本研究では原位置かつ非破壊で透気性を評価し、コンクリートの密実さを評価することが可能なトレント法（ダブルチャンバー法）に着目する。また、現状として、透気性を指標とした初期凍害の判断手法に関する研究は行われていない。

本研究では、トレント法による透気係数を指標とした初期凍害の判断の可能性を検討することを目的とし、床スラブを模擬して初期凍害を与えたモルタル試験体を用いて、トレント透気係数により初期凍害が判断可能であるか検討し、さらに、トレント透気係数に及ぼす凍結深さの影響について検討を行った。

## 2. 実験計画・方法

### 2.1 使用材料、調合および実験条件

本研究ではモルタルを用いた2つの実験検討を行った。実験計画を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm<sup>3</sup>）、細骨材は登別産陸砂（表乾密度 2.67g/cm<sup>3</sup>）を使用した。モルタルの調合は水セメ

表-1 本研究における実験計画表

	試験体名	W/C [%]	C:S	試験体寸法 [mm]	条件	凍結開始	冷却温度 [°C]	冷却時間 [hour]	測定材齢	測定項目
検討1	N	50	1:3	Φ 100 × 200	凍結無	-	-	-	1,2,3,7,14,28日	表層含水率 トレント透気係数 超音波伝播速度 28日圧縮強度(検討1のみ) 28日細孔径分布(検討1のみ) 28日全空隙量(検討1のみ)
	F-D0				表層凍結	練り置き 2時間後	-20	15	凍結後 1, 2, 3, 7, 14, 28日	
	F-D20				全面凍結					
検討2	N				凍結無	-	-	-	1,2,3,7,14,28日	
	F-D0				表層凍結	練り置き 2時間後	-20	15	凍結後 1, 2, 3, 7, 14, 28日	
	F-D1.5				1.5cm凍結					
	F-D3.0				3.0cm凍結					
	F-D4.5				4.5cm凍結					
	F-D6.0				6.0cm凍結					
	F-D7.5				7.5cm凍結					
	F-D9.0	9.0cm凍結								
	F-D20	全面凍結								

\*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建築社会基盤系専攻 博士前期課程 (正会員)  
 \*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境領域 教授 博士(工学) (正会員)  
 \*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設環境工学専攻 博士後期課程 修士(工学) (正会員)  
 \*4 室蘭工業大学 工学部建築社会基盤系学科 (会員外)

ント比を 0.5, セメント : 細骨材 = 1 : 3 とした。

共通の実験条件として, モルタル混練の後, プリーディングを抑制するために 2 時間の練り置き, 練り返しを行った後,  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の樹脂製型枠に打設した。その後直ちに試験体を  $-20^\circ\text{C}$  の環境で 15 時間冷却し凍結させた。15 時間の凍結後,  $20^\circ\text{C} \cdot 60\%$  の恒温恒湿室に静置して融解し, 1 日後に脱型し, 試験体側面に防湿粘着テープを取り付け, 上面は開放状態で 28 日間養生を行った。その間, 所定の材齢 (融解後 1, 2, 3, 7, 14, 28 日) で表層含水率およびトレント透気係数の測定を行った。

検討 1 では, 床スラブを模擬して写真-1 のように断熱材を用いて試験体を囲み, 表層部のみを凍結させた表層凍結の試験体と断熱材を用いずに試験体全体を凍結させた全面凍結を用いて検討を行った。

検討 2 では, 図-1 に示すように断熱材から試験体を露出させることで凍結深さを变化させた試験体を用いて検討を行った。

## 2.2 試験体条件

予備実験として, トレント法で測定できる円柱試験体の寸法を確認するために, 側面に防湿粘着テープを貼りつけて外部からの空気の流入を防止した状態の  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  と  $\phi 125 \times 250\text{mm}$  の円柱試験体でトレント透気係数の測定を行った。その結果, トレント透気係数の測定値には試験体寸法の違いによる差が認められなかったため,  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱試験体を用いることとした。

また, 検討 2 での試験体露出高さは試験体上面を 0mm~90mm まで 15mm ごとに露出させて凍結を与えた 7 水準と試験体全体を凍結させた試験体および凍結させずに  $20^\circ\text{C}$  養生のみとした試験体の 2 水準, 計 9 水準の試験体を用意し, 実験を行った。

## 2.3 実験方法

測定項目は, 表層含水率, トレント透気係数, 超音波伝播速度, 圧縮強度, 細孔径分布, 全空隙量とした。

表層含水率の測定は高周波容量式水分計を用いて試験体上面の測定を行った。

トレント透気係数はトレント法 (ダブルチャンバー法) を用いて写真-2 に示す通り, アタッチメントを用いて透気係数を測定した。トレント法は, 図-2 に示すように外部と内部のチャンバーからなっており, 外部のチャンバーが内部チャンバーへの空気の流入を防ぎ, 測定面からの栓流を一定にする。そして, 内部チャンバー内の圧力の経時変化から測定面の透気係数を算出している<sup>4)</sup>。

超音波伝播速度は凍結深さを確認するため,  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱試験体を用い, 試験体上面から 1cm ごとに測定し, 凍結深さの検証を行った。さらに, 凍結状況を確認するため,  $0^\circ\text{C}$  以下で変色する不可逆性のサーモ



写真-1 実験概要図

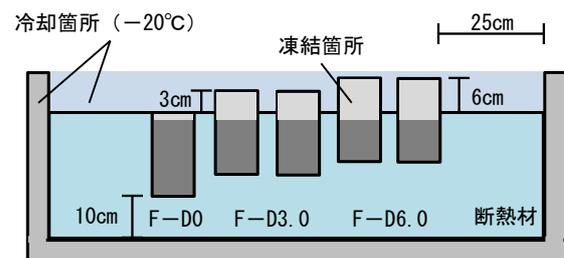


図-1 冷凍庫断面図の一例  
(例:F-D0, D3.0, D6.0)



写真-2 トレント透気係数測定時の様子

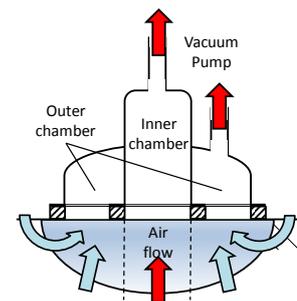
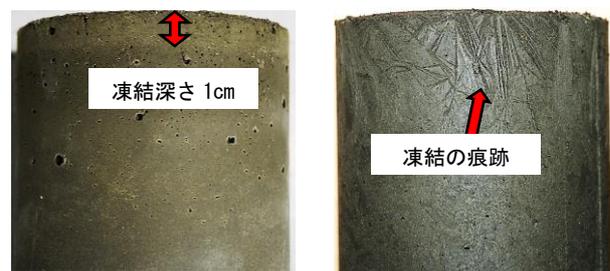


図-2 トレント法概要



表層凍結 (F-D0)

全面凍結 (F-D20)

写真-3 表層凍結 (F-D0) および全面凍結 (F-D20) における初期凍害痕跡

テープを用いた。

圧縮強度は,  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱試験体を用い, 材齢 28 日において JIS A 1108 に準じて試験を行った。

細孔径分布は水銀圧入法による測定, 全空隙量はアルキメデス法による測定を行った。水銀圧入法, アルキメデス法に用いるサンプルは, 圧縮強度試験以外の測定に

用いた材齢 28 日の試験体を用いた。試料採取部は試験体上面から 2cm までの表層と試験体中心部であり、その箇所から 5mm 角の立方体を切り出し、1 週間のエタノール置換による水和停止および D-dry による乾燥を行ったものを用いた。

### 3. 実験結果・考察

#### 3.1 目視、圧縮強度および空隙構造測定による初期凍害の評価

写真-3 に全面凍結 (F-D20) および表層凍結 (F-D0) 後の試験体を示す。目視により、両方の試験体において、初期凍害を受けた箇所に痕跡があることを確認した。さらに表層凍結では約 1cm、全面凍結では 20cm の凍結深さであることを確認した。

図-3 に凍結無 (N)、全面凍結 (F-D20)、表層凍結 (F-D0) の 28 日の圧縮強度を示す。凍結無と比べて、全面凍結では約 20%強度が低下し、表層凍結では同等の値を示している。これは、全面凍結では、試験体全体の組織が脆弱になり強度発現が停滞しているためと考えられる。一方、表層凍結では、試験体表層の組織のみが脆弱となっているため、凍結無と比較して圧縮強度に差が見られなかったと考えられる。

図-4 に凍結無 (N)、全面凍結 (F-D20)、表層凍結 (F-D0) の表層 2cm までにおける微分細孔容積を比較して示す。凍結無 (N) に比べて、凍結させた全面凍結 (F-D20)、表層凍結 (F-D0) では直径 100~1000nm の範囲の細孔量が減少し、直径 1000~10000nm の範囲の細孔量が増加している。一方、中心部における微分細孔容積を示した図-5 では、いずれの場合においても表層 2cm (図-4) と比べて直径 100~1000nm の細孔が減少し、数 10nm に細孔径分布のピークが見られる特徴を有している。これは、ブリーディングの影響のある表層部よりも中心部の組織が緻密になっていることを意味している。また、全面凍結 (F-D20) のみで直径 1000~10000nm の範囲の細孔量が増加しており、図-4 での凍結させた試験体の結果と同様の傾向を示している。

図-6 に凍結無 (N)、全面凍結 (F-D20)、表層凍結 (F-D0) における表層 2cm までの全空隙量の比較を示す。凍結無と比較して、全面凍結および表層凍結の全空隙量が多い。続いて、図-7 に試験体中心部における全空隙量の比較を示す。凍結無と比較して、全面凍結の全空隙量が増加しているが、表層凍結ではほぼ同量である。

以上のことから、全面凍結の試験体では中心部まで、表層凍結では表層のみ初期凍害を受け、水分の体積膨張により、組織が粗大化していることを確認した。

#### 3.2 トレント透気係数を用いた初期凍害の判断

図-8 に凍結無 (N) を基準とした各深さにおける 28

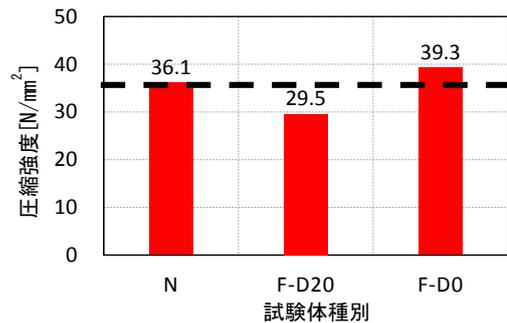


図-3 28日圧縮強度の比較

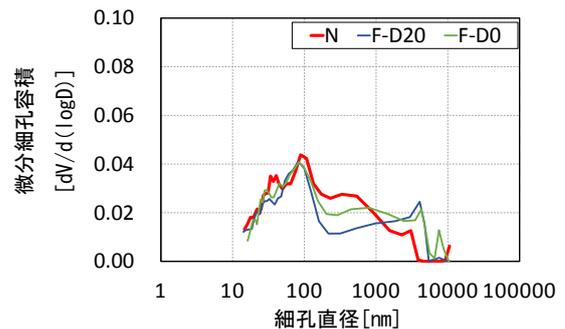


図-4 表層 2cm までにおける微分細孔容積の比較

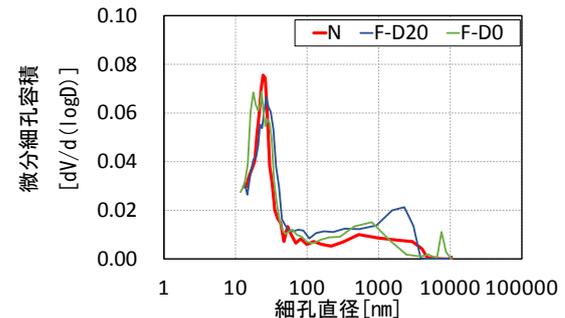


図-5 中心部における微分細孔容積の比較

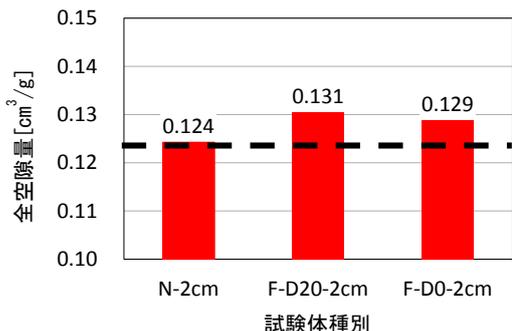


図-6 表層 2cm までにおける全空隙量の比較

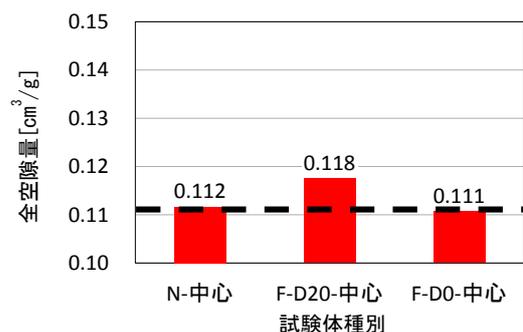


図-7 中心部における全空隙量の比較

日の超音波伝播速度の比を示す。全面凍結を与えた試験体 (F-D20) では、表面から約 20cm までの深さにおいて超音波伝播速度が 90~95% の範囲まで低下している。表層凍結を与えた試験体では、表面からの深さ約 4cm まで低下している。表層凍結を与えた試験体において試験体上面からの深さ 10cm 以降で超音波伝播速度比が低下しているのは底面部の断熱材厚さが 10cm であったため、底面部から冷却されていた影響の可能性がある。以上より、全面凍結した試験体では上面から深さ 20cm、表層凍結を与えた試験体では上面からの深さ約 4cm まで劣化している可能性があると考えられる。

透気係数は含水率の影響を大きく受けることは良く知られており<sup>5-7)</sup>、透気係数を品質評価の指標とするためには含水率の違いを考慮する必要がある。図-9 に表層含水率の経時変化を示す。材齢初期において、全ての試験体で表層含水率が約 10~12% であり、7 日以降で約 5~6% となっている。これは、材齢とともに水和の進行および乾燥が生じ、試験体表層の水分が減少したためであると考えられる。本研究では、打設後の条件は全ての試験体で共通であるため表層含水率の変化に大きな差が見られないことから、トレント透気係数の相互比較が可能であると考えられる。

図-10 に凍結無 (N)、全面凍結 (F-D20)、表層凍結 (F-D0) を与えた試験体のトレント透気係数の経時変化を示す。全ての試験体で材齢 3 日目までトレント透気係数が増加しており、7 日以降ほぼ一定となっている。これは、図-9 の表層含水率の経時変化と対応した結果である。また、7 日以降の値では、全面凍結 (F-D20) のトレント透気係数が  $1000 \sim 10000 \times 10^{-16} \text{m}^2$  と最も高く、凍結無 (N) と表層凍結 (F-D0) が  $1 \sim 10 \times 10^{-16} \text{m}^2$  と同程度となっている。ここで、凍結無 (N) と全面凍結 (F-D20) の結果を比較すると、トレント透気係数に大きな差が見られる。このことから、トレント法を用いて初期凍害を判断することが可能であると考えられる。よって、本研究で想定した初期凍害による組織の粗大化で透気性が変化することを示唆していると考えられる。一方、凍結無 (N) と表層凍結 (F-D0) の透気係数がほぼ同等となることから、表層組織の構造が変化してもトレント透気係数には影響が見られないと考えられる。これにより、凍結深さがトレント透気係数に影響を及ぼすといえる。

### 3.3 トレント透気係数に及ぼす凍結深さの影響

図-11 に材齢 28 日の凍結無 (N) を基準とした各深さにおける超音波伝播速度比の比較を示す。この結果より、超音波伝播速度比が低下しはじめる深さが試験体露出高さ (凍結深さ) に対応して変化していることがわかる。つまり、初期凍害を受けている深さが異なることを意味している。

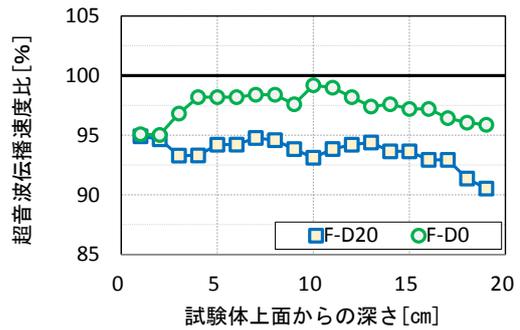


図-8 N を基準とした各深さにおける 28 日の超音波伝播速度比

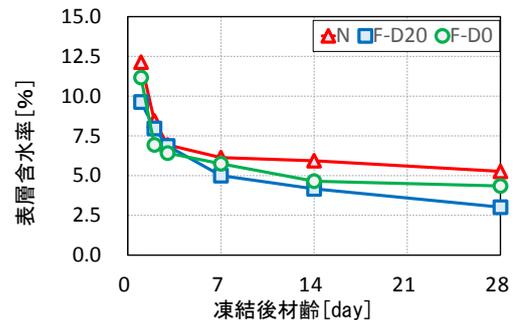


図-9 表層含水率に及ぼす凍結深さの影響

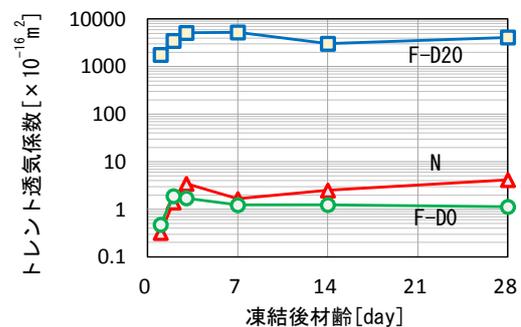


図-10 トレント透気係数における凍結無 (N)、全面凍結 (F-D20)、表層凍結 (F-D0) の比較

図-12 にトレント透気係数に及ぼす凍結深さの影響を示す。試験体露出高さによって初期のトレント透気係数が大きくばらつき、その後の変化の挙動も異なっている。凍結無および試験体露出高さ 0, 1.5, 3.0cm では、初期のトレント透気係数は  $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以下の小さな値を示しており、材齢 3 日目まではトレント透気係数がやや増加しているが、材齢 7 日以降も  $0.1 \sim 10 \times 10^{-16} \text{m}^2$  の範囲で安定している。一方、露出高さ 4.5cm 以上では、初期のトレント透気係数が  $100 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以上の大きな値を示しており、材齢 3 日目まではほぼ一定か低下傾向を示し、その後も  $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以上の極めて大きな値となっている。

トレント透気係数は、表層含水率の変化および水和反応による組織の緻密化によって変化するものであり、凍

結深さの小さな試験体露出高さ 3cm 以下の試験体での材齢の進行に伴うトレント透気係数の上昇は乾燥による表層含水率の低下が影響していると考えられ、凍結深さが大きい露出高さ 4.5cm 以上の試験体での材齢の進行に伴うトレント透気係数の低下傾向は水和反応による組織の緻密化が影響していると考えられる。

図-13 に露出高さを与えた各試験体の凍結後材齢 1 日および 28 日におけるトレント透気係数を示す。この図より、凍結後材齢 1 日において、試験体露出高さ 3.0cm までの透気係数は  $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以下となっている。また、露出高さ 4.5cm 以上の透気係数は  $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以上と差が見られる結果となっている。ここで、既往の研究<sup>8)</sup>において、トレント透気係数の評価区分が示されており、 $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以上の場合、very bad と評価している。今回の結果において、試験体露出高さが 4.5cm 以上でトレント透気係数が  $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以上である。これにより、凍結深さが 4.5cm 以上の場合において、明らかに初期凍害を受けていると判断可能である。さらに、凍結後材齢 28 日においても 4.5cm 以上の凍結深さを与えた場合も同じように透気係数が very bad の範囲である。これにより、凍結後材齢 1 日と同様に初期凍害と判断可能ではあるが、図-12 の結果の通り、露出高さを与えた試験体において材齢進行とともに水和反応により透気係数が低下する傾向を示している。このため、凍結後 28 日以降において初期凍害の判断が困難になる可能性があると考えられる。したがって、凍結後材齢の初期における凍結深さが 4.5cm 以上の場合において、トレント法により明確な初期凍害が判断可能である。

#### 4. まとめ

本研究ではトレント透気係数により、初期凍害が判断可能であるか検討し、トレント透気係数に及ぼす凍結深さの影響の検討を行った。

- (1) 従来の強度試験による初期凍害の評価において、全面凍結 (F-D20) においては組織が脆弱になり、強度低下が見られた。しかし、表層凍結 (F-D0) は表層組織のみが脆弱になっていたため、圧縮強度に影響を与えなかった。
- (2) 細孔径分布および全空隙量の結果より、表層凍結 (F-D0) および全面凍結 (F-D20) における表層部の細孔直径 100~1000nm の範囲の細孔量が少なく、1000~10000nm の範囲の細孔量が多い。このことから、細孔の直径が 1000~10000nm の範囲において初期凍害を受ける際の水分の体積膨張により、組織が粗大化することが確認できた。
- (3) 打設後の条件は全ての試験体で共通であるため表層含水率に大きな差が見られないことから、

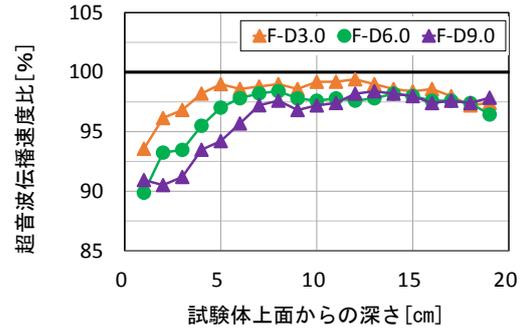


図-11 Nを基準とした各深さにおける28日の超音波伝播速度比

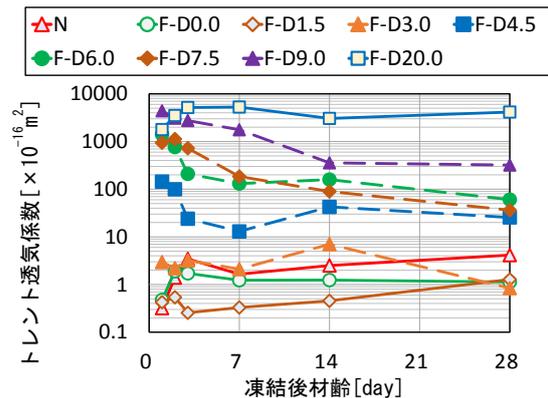


図-12 試験体露出高さ毎のトレント透気係数の経時変化

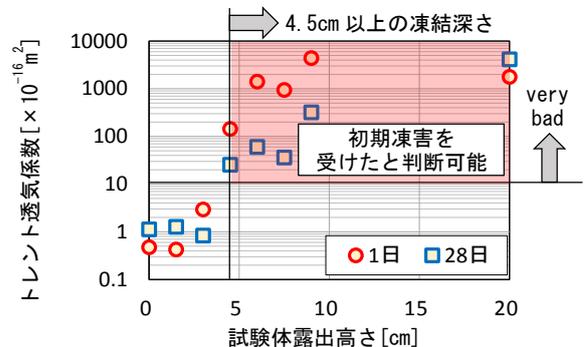


図-13 トレント透気係数と試験体露出高さの関係

トレント透気係数の相互比較が可能である。

- (4) 凍結無 (N) と全面凍結 (F-D20) におけるトレント透気係数に大きな差が見られた。これにより、トレント法を用いて初期凍害を判断することが可能である。よって、本研究で想定した初期凍害による組織の粗大化で透気性が変化することを示唆している。さらに、凍結無 (N) と表層凍結 (F-D0) における透気係数はほぼ同等の値を示すことから凍結深さがトレント透気係数に影響を及ぼすと考えられる。
- (5) 超音波伝播速度の比より、速度が低下しはじめる深さが試験体露出高さ (凍結深さ) に対応して変化していることがわかる。よって、初期凍害の

深さが異なることがわかり、おおよその凍結深さの把握が可能である。

- (6) トレント透気係数の経時変化の結果より、試験体露出高さ 3.0cm までの試験体では材齢の進行に伴う乾燥による表層含水率の低下が透気係数に影響を及ぼす。一方、露出高さ 4.5cm 以上の試験体においては材齢の進行に伴う水和反応による組織の緻密化が透気係数に影響及ぼすことがわかった。
- (7) トレント透気係数と試験体露出高さの関係より、透気係数  $10 \times 10^{-16} \text{m}^2$  を基準とし、なおかつ凍結後材齢初期において凍結深さが 4.5cm 以上の場合、トレント法により明確に初期凍害が判断可能である。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説所，2010
- 2) 金武漢，横山隆，田畑雅幸，洪悦郎，鎌田英治：コンクリートの初期凍害耐力に及ぼす空気量の効果に関する研究(第1報 普通コンクリートの場合)，日本建築学会論文報告集，Vol.265，pp.1~9，1978.3
- 3) 今本啓一，下澤和幸，山崎順二，二村誠二：実構造

物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート技術の要点'05 テクニカルレポート，Vol.44，No.2，2006.2

- 4) R.J. Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, 25, pp.358-365, 1992
- 5) 中村暢，濱幸雄，岸本嘉彦：コンクリートの透気性状による中性化速度および相対動弾性係数の推定手法，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.85，pp.5~8，2012.6
- 6) 水上翔太，早川健司，加藤佳孝，勝木太：含水状態を考慮した構造体かぶりコンクリートの透気性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，2011
- 7) 蔵重勲，廣永道彦：脱型材齢や曝露環境がコンクリートの強度特性や表層透気性ならびに中性化抵抗性に及ぼす影響の実験的評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32，No.1，2010
- 8) R. Torrent, G. Frenzer: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the "covercrete", *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)* 26.-28.09.1995